

위상 제어 방식 단상유도전동기의 토크 특성

김철진, *최철용*, **이달은, **윤신용, **백수현
*한라대학교, **동국대학교

Torque characteristic of single phase induction motor for phase control mode

Cherl-Jin Kim, Chul-Yong Choi, Dal-Eun Lee, Shin-Yong Yoon, Soo-Hyun Baek
Halla University, Dongguk University

Abstract - Single phase induction motor is directly used usual source, it can be a source of an appliance such as mechanical fan, refrigerator, washing machine, etc. Especially capacitor-run single phase induction motor is suitable to make more inexpensive and high efficient products because it is more high efficiency, and good to start than other single phase induction motors.

Generally, voltage and current of capacitor-run single phase induction motor transfer to the part of positive phase and negative phase based on two motor theory. In this paper, we simulate the torque characteristics to capacitance variation from single phase induction motor's equivalent circuit.

Through the test using the real motor, we compare and investigate the maximum torque of run state related with capacitance and the adequacy of the converted model.

1. 서 론

단상유도전동기는 대부분의 일반가전용품 등의 상용전원기기에 쓰이므로, 일반적으로 널리 사용되는 전동기중의 하나이지만, 3상 유도기와는 달리 전동기 자체만으로는 회전자계를 얻지 못하는 특성이 존재한다.

그러나 커패시터구동형 단상유도전동기(SPIM)의 주권선과 병렬연결된 보조권선에 직렬로 커패시터를 연결함으로써 보조권선 전류의 위상이 전상으로 앞서게되어 전동기의 기동이 가능하며, 기동 후 시간의 경과에 따라 맵동하는 자계를 발생하고 이 자계에 의해 지속적인 토크를 발생하게 된다.

커패시터구동형 단상유도전동기의 커패시터용량을 선정할 때, 운전중의 출력특성을 주목적으로 하는 경우 기동시 커패시터용량이 적기 때문에 기동토크가 적고, 기동시에 적용한 비교적 대용량의 커패시터를 구동 중에도 계속 사용하게 되면 무부하 및 경부하 시 효율이 저하하고, 보조권선의 포화, 불평형운전에 의한 심한 자기진동의 발생 우려가 있다. 따라서 커패시터용량의 선정에 주의하여야 한다.

본 연구에서는 단상유도전동기의 전압과 전류를 정상 및 역상성분으로 변환한 모델을 기초로 한 등가회로로부터 벡터해석을 이용해 커패시터 용량에 따른 토크를 산출, MATLAB 시뮬레이션을 통해 커패시터용량에 따른 출력 토크의 변화를 예측하였으며, Triac 위상제어 구동 회로를 제작하여 모터를 구동하고 변환 모델의 타당성과 커패시터 용량에 따른 구동상태의 최대 토크를 비교 검토하였다.

또한, 주권선과 보조권선의 위상각에 따른 토크의 변화를 시뮬레이션을 통해 확인하였고, 제어기에 동일부하를 건 상태에서 커패시터의 변화에 의한 위상에 따른 전류를 측정하여 비교 검토하였다.

2. 커패시터 구동형 단상유도전동기

2.1 전동기 특성

커패시터구동형 단상유도전동기는 보조권선에 직렬로 삽입된 커패시터에 의해 주권선과 보조권선에는 90도 정도의 위상차가 생겨 회전하게 된다.

그림1의 등가회로는 커패시터구동형 단상유도전동기의 등가회로를 나타내고, 주권선에서 발생된 자계에 의해 유기되는 전압과 보조권선에서 발생된 자계에 의해 유기되는 전압은 식(1)과 같이 된다.

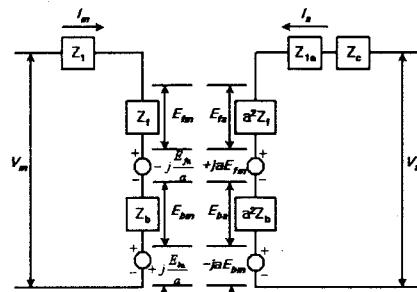


그림 1 SPIM의 등가회로

$$\begin{aligned} E_{fa} &= I_m Z_f \\ E_{ba} &= I_m Z_b \\ E_{fb} &= I_a a^2 Z_f \\ E_{ab} &= I_a a^2 Z_b \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 a는 권선비이며 보조권선에 의한 자계는 주권선에 전압을 유기하고 보조권선에 생긴 전압의 $1/a$ 배의 크기를 갖는다. 그러나 두 권선의 공간적인 상대위치 때문에 보조권선의 정방향 회전자계에 의하여 주권선에 유기된 전압은 90° 지연되어 보조권선의 정방향 전압에 비해 위상이 지연된다. 또한 보조권선의 역방향 회전자계에 의하여 주권선에 유기된 전압은 같은 자계에 의하여 보조권선에 유기된 전압에 90° 앞선다.

위의 등가회로의 전압은 다음 식(2)와 같이 나타내며 이 식을 주권선 전류와 보조권선 전류로 나타내면 식(3)과 같이 간소화 된다.

$$\begin{aligned} V_m &= I_m Z_1 + I_m Z_f - jaI_a Z_f + I_m Z_b + jaI_a Z_b \\ V_a &= I_a Z_{1a} + I_a Z_c + a^2 I_a Z_f + jaI_m Z_f + a^2 I_a Z_b - jaI_m Z_b \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} I_m &= \frac{V_m Z_{Ta} + jV_a a(Z_f - Z_b)}{Z_f Z_{Ta} - a^2 (Z_f - Z_b)^2} \\ I_a &= \frac{V_a Z_T - jV_m a(Z_f - Z_b)}{Z_f Z_{Ta} - a^2 (Z_f - Z_b)^2} \end{aligned} \quad (3)$$

2.2 토크(Torque)

정, 역방향 자계에 의해 주권선에 유기된 전압은 식(4)와 같다.

$$\begin{aligned} E_f &= (I_m - jaI_a)Z_f \\ E_b &= (I_m + jaI_a)Z_b \end{aligned} \quad (4)$$

다음의 그림2는 커패시터 구동형 단상유도전동기의 전류의 위상관계를 나타낸 그림이다.

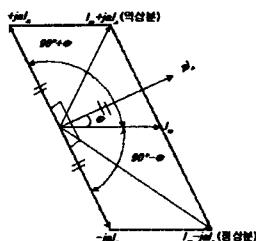


그림 2 커패시터 구동형 단상유도전동기의 전류 페이저도

양 자계에 기인한 토크는 각각의 자계에 관계하는 저항에 전류를 제곱함으로서 구한다. 정방향 자계에 의한 전류와 역방향 자계에 의한 전류는 그림2와 같고, 보조권선의 전류와 주권선 전류는 ϕ 의 위상차를 갖는다.

커패시터구동형 단상유도전동기의 구동토크는 정방향 토크에서 역방향 토크의 차에 의해 나타나므로 식(6)과 같이 나타낸다.

$$T_f = [I_m^2 + (aI_a)^2 + 2aI_mI_a \sin \phi]R_f \quad (5)$$

$$T_b = [I_m^2 + (aI_a)^2 - 2aI_mI_a \sin \phi]R_b \quad (6)$$

$$T = T_f - T_b = \frac{\{I_m^2 + (aI_a)^2\}(R_f - R_b) + (2aI_mI_a \sin \phi)(R_f + R_b)}{\omega_{sym}} \quad (6)$$

3. 특성해석

본 연구에서는 식(5)로 나타내어진 토크 수식을 이용하여, 커패시터의 변화에 따른 토크의 세부적인 변화를 모델링하였다.

특성해석을 위해 적용한 모터의 출력은 4극, 40[W]이며, 파라미터는 실제 모터의 기본데이터로부터 시뮬레이션하였고, 시뮬레이션에 적용한 단상유도전동기의 파라미터는 표1과 같다.

표 1 모터의 파라미터

파라미터(Parameter)	수치
주권선 저항	63.5729
주권선 리액턴스	49.8734
보조권선 저항	76.202
보조권선 리액턴스	71.0875
회전자 저항	199.895
회전자 리액턴스	82.2302
자화 리액턴스	849.654
슬립	0.2775
권수비	1.09155

그림3은 주권선과 보조권선의 위상각을 변화시켜 토크를 나타낸 결과이다. 주권선과 보조권선의 위상차가 발생함에 따라, 토크가 서서히 증가하여 약 90° 지점에서 최대의 토크가 발생함을 시뮬레이션을 통해 알 수 있었다.

다음의 그림4는 커패시터 구동형 단상유도전동기의 커패시터 용량별 토크특성의 시뮬레이션 결과이다. 여기서, 커패시터의 용량이 증가함에 따라 구동토크가 일정한 용량(7.5[μF])에서 최대토크가 발생하며, 보다 용량이 증가하는 경우에는 구동토크가 저감하는 특성을 나타냄을 알 수 있다.

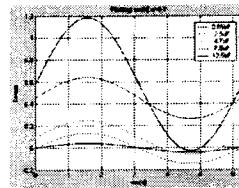


그림 3 각 커패시터별 위상각-토크 곡선

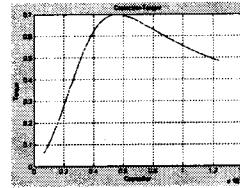


그림 4 구동시 커패시터용량 변화에 따른 토크변화

4. 실험결과 및 고찰

Triac을 상용라인에 직접 연결하고 주권선에서 영전압을 검출하여 위상각을 제어 하는 토크제어기를 설계하였다. 그림 5는 토크제어기의 전체 구성도이다.

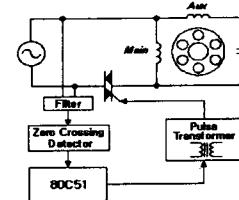


그림 5 위상제어방식 토크제어기

제작한 제어기를 이용하여 모터의 커패시터를 0.65[μF]-12.5[μF]로 각각 변화시켜 커패시터-토크, 속도-토크를 시뮬레이션과 실험으로 비교하였다.

시뮬레이션결과 그림4와 실험한 데이터를 그래프로 나타낸 그림6를 분석해 보면, 그림4와 같은 경우 기동토크(s=1)의 경우를 시뮬레이션하였고, 그림6의 경우는 구동상태에서의 토크를 측정한 것이기 때문에 약간 차이가 있으나 커패시터의 변화에 따른 토크의 형태는 비슷하고, 토크측정 실험시 커패시터용량이 6[μF]보다 커지면 소음과 진동이 발생되는 실험결과로부터 최적의 커패시터를 선정하기에 적절함을 알 수 있다. 따라서 제안된 수식을 사용하여 커패시터구동형 단상유도전동기도 최대 토크를 발생하는 커패시터용량을 결정할 수 있음을 확인하였다.

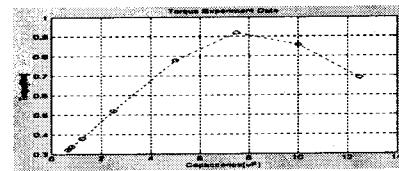
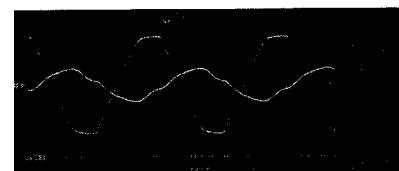
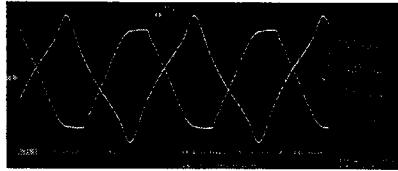


그림 6 커패시터의 용량별 토크 실험

그림7의 곡선은 주권선 전압과 보조권선에 흐르는 전류를 커패시터의 용량을 다양하게 변화하여 실험한 결과를 나타낸 곡선이다. 위상제어방식 제어기의 점호각 0°에서 트리거 시켜 구동하였으며, 커패시터가 증가함에 따라 위상이 점진적으로 위상차가 변동함을 알 수 있었다.



b) 2.5[μF]



c) $7.5[\mu\text{F}]$

그림 7 주권선 전압과 보조권선에 흐르는 전류

또한, 그림3에 $12[\mu\text{F}]$ 의 커패시터에서 최대의 토크를 나타낸 바와 같이, 그림7에서도 커패시터가 증가함에 따라 토크와 전류가 급진적 증가하였으나 $6[\mu\text{F}]$ 의 커패시터를 연결한 후부터 소음과 진동이 발생하였다.

소음과 진동의 발생원인으로는 TRIAC을 사용한 위상 제어방식으로 점호각을 제어하므로 Turn ON/OFF 시 고조파가 발생한 것으로 추정되며, 커패시터가 $2.5[\mu\text{F}]$ 과 $7.5[\mu\text{F}]$ 일 때 각각의 입력전류에 따른 FFT분석 결과는 그림8에 나타내었다.

나타난 바와 같이, $2.5[\mu\text{F}]$ 과 $7.5[\mu\text{F}]$ 의 고조파를 비교해 봤을 때, 그림8 b)의 경우 제 3고조파가 기본파의 75[%]정도로 증가하고 고조파 전체적으로 증가하였음을 알 수 있다.

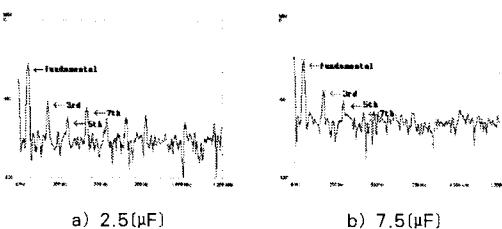


그림 8 고조파 분석

그림9와 그림10에 나타낸 $0.65[\mu\text{F}]$ - $12.5[\mu\text{F}]$ 까지의 속도-토크 특성을 비교해보면, 커패시터에 따라 기동토크는 비례적으로 증가하며 최대 토크점은 저속으로 이동하는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 본 연구에 사용한 모터모델에서 최대토크를 발생하기 위한 커패시터 용량은 $7.5[\mu\text{F}]$ 이고, 이 용량을 초과하면 토크가 저감됨을 시뮬레이션과 실험을 통하여 확인하였다. 그러나, $7.5[\mu\text{F}]$ 의 커패시터를 사용하여 구동시 고정자, 회전자에 전자기적 가진력에 의한 철심의 진동에 기인하여 생기는 소음·진동현상이 발생되므로 $7.5[\mu\text{F}]$ 으로 구동시 최대토크를 얻을 수 있으나, 안정된 구동을 하기에는 $7.5[\mu\text{F}]$ 의 커패시터는 적절하지 않음을 알 수 있었다.

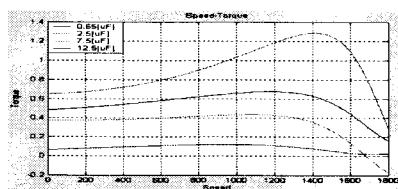


그림 9 속도-토크 시뮬레이션

실험을 통해서 커패시터를 바꿔가며 속도에 따른 효율을 측정하였고, 측정한 데이터를 Matlab으로 그림11과 같이 나타내었다. 각 커패시터 용량에 대한 속도-효율을 비교해 봤을 때 $7.5[\mu\text{F}]$ 의 커패시터로 구동시 효율이 떨어지는 반면, $2.5[\mu\text{F}]$ 의 커패시터로 구동시 비교적 높게 나타나는 것을 확인 할 수 있었다.

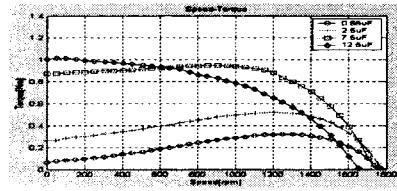


그림 10 속도-토크 특성 실험

따라서, 본 연구에서 모터의 파라미터를 적용한 최적의 구동을 하기 위한 커패시터는 $2.5[\mu\text{F}]$ 임을 확인 할 수 있었다.

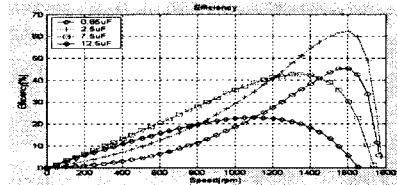


그림 11 커패시터 용량별 효율

3. 결 론

커패시터구동형 단상유도전동기의 출력은 제 파라미터 크기와 커패시터 용량 및 위상각에 의해 결정된다.

본 연구에서는 커패시터구동형 단상유도전동기를 등가회로로 나타내고, 주권선과 보조권선에 흐르는 전류를 벡터해석하여 토크를 산출하였다. 이를 Matlab으로 특성 해석 하였고, 해석결과의 타당성을 확인하기 위하여 220 [V], 4극, 40[W]용량의 실제모터를 이용하여 실험하였으며, 모터의 파라미터를 적용하여 적절한 커패시터용량을 산출하였다. 또한, 커패시터와 위상각의 변화에 따른 토크를 비교·검토 하였다.

커패시터 용량에 따라 위상각이 가변 되었고, 위상각에 따라 전류와 토크가 급변하는 것을 확인하였다. 실험에 적용한 40[W]출력의 전동기의 경우 약 1600 [rpm]에서 $2.5[\mu\text{F}]$ 을 적용하면 효율이 최대(63[%])가 되며 1300 [rpm]에서의 최대토크는 $0.47[\mu\text{F}]$ 을 나타내었다.

본 연구의 특성해석결과와 더불어 출력용량과 다양한 형상에 대해서도 적용할 수 있는 보다 일반성을 갖는 관계를 도출하기 위한 연구가 이루어 진다면 산업적으로 매우 유용한 응용이 가능할 것으로 기대된다.

(참 고 문 헌)

- [1] 박민호, 유도기기, 동명사, pp.286-562, 1969.
- [2] 장도현 외, 전기기기공학, 사이텍미디어, pp.381-419, 1998.
- [3] 유준형 이광원, “보조권선 전압제어에 의한 커패시터 린 유도전동기의 속도제어”, KIEE, Vol.48B, NO.7, pp.357-362, July. 1999.
- [4] Ph.RABIER, "TRIAC CONTROL BY BULSE TRANSFORMER", SGS-THOMSON, 1995.
- [5] X.DURBECCQ, " CONTROL BY A TRIAC FOR AN INDUCTIVE LOAD HOW TO SELECT A SUITABLE CIRCUIT", SGS-THOMSON, 1995.
- [6] E. R. Collins, Jr., "Operating Characteristics of Single-Phase Capacitor Driven from Variable Frequency Supplies", IEEE IAS'91, pp.52-57, 1991.
- [7] Eduard Muljadi, "Adjustable ac Capacitor for a Single-Phase Induction Motor", IEEE, Vol.29, NO.3, pp.479-485, 1993.
- [8] E. R. Collins, Jr., "Improved methods for determining the equivalent circuit parameters for single-phase induction motor models", IEEE IAS'93, pp.390-395, 1993
- [9] H. Huang, "OPTIMAL PLACEMENT OF THE RUN CAPACITOR IN SINGLE-PHASE INDUCTION MOTOR DESIGNS", IEEE, Vol.3, No.3, pp.647-652, 1988